

飞轮储能特性及其研究状况

马骏毅¹, 陈 蕾², 王弘法³, 陈国华¹, 黄 治¹, 姚 勇¹

(1. 镇江供电公司, 江苏 镇江 212001; 2. 扬州仪征市供电公司, 江苏 扬州 211400;
3. 盐城建湖县供电公司, 江苏 盐城 224700)

摘 要: 飞轮储能系统作为一种新型物理储能方式以其在效率高、容量大、响应快和对环境友好等优点得到了广泛关注。本文首先介绍了飞轮储能系统的工作原理和分类, 并对高速和低速两类飞轮储能系统做了分析比较。重点分析了飞轮储能系统的能量特性、功率特性、传动链模型以及充放电控制等, 对国内外研究现状进行了阐述。介绍了飞轮储能的技术应用, 展示其良好的应用前景。

关键词: 飞轮储能系统; 工作原理; 能量特性; 功率特性; 研究现状; 技术应用

0 引言

在众多储能技术中, 飞轮储能系统(Flywheel Energy Storage System, FESS)以效率高、容量大、响应快和对环境友好等优点^[1], 越来越受到国内外学者的重视。飞轮储能系统是由高速飞轮、磁轴承系统、永磁电动/发电机、能量转换控制系统以及附加设备组成^[2], 它是以高速旋转的飞轮质体作为机械能量储存的介质, 利用电动发电机和能量转换控制系统来控制能量的输入和输出, 达到充电和放电的目的。飞轮储能系统作为一种逐渐成熟的储能技术, 已经应用到包括航空航天、电动汽车、电力等领域, 逐步取代化学电池储能, 成为储能行业一支不可忽视的力量。飞轮储能系统旋转时不会发生任何化学反应, 是纯粹的机械运动, 对环境非常友好, 因而受到越来越广泛的关注。

飞轮储能系统的工作状态根据暂态运行通常分为充电和放电两部分, 其工作原理是当外部电能充足时, 系统将电能通过飞轮电动机转化为机械能储存起来; 当系统外部电能不足时, 将飞轮存储的机械能转化为电能输出到外部负载^[10]。

作为一种新型的物理储能方式, 飞轮储能与传统化学电池相比, 具备有以下优点^[11]:

(1) 充放电迅速。从收到来自电网侧的调节信号到飞轮储能系统做出反应, 时间极短, 并且在之后数分钟时间内能够完成整个系统的充/放电过程, 符合电网的短时响应与调节需求, 相比于蓄电池、抽水蓄能、压缩空气等, 具有较快的充/放电时间。

(2) 工作效率高。一般的飞轮储能系统工作效率可以达到 90% 左右^[12], 相比于抽水蓄能的 60%, 蓄电池储能的 70%, 具有明显的优势, 而且采用磁悬浮轴承的飞轮储能系统, 其工作效率更高, 接近 95%。

(3) 使用寿命长。飞轮储能系统虽价格昂贵, 但是设计良好, 其年平均维护费用极低, 充放电次数明显优于蓄电池储能等, 达到了百万数量级, 一般免维护的时间是在 10 年以上。

(4) 环保无污染。由于机械储能的缘故, 飞轮储能不会排放出污染环境的物质, 是一种环境友好型的绿色储能技术。

此外, 飞轮储能系统还具有模块性、建设时间短、事故后果影响低等优点。

1 飞轮储能系统的工作原理和分类

飞轮储能系统的功能组成元件是高速旋转的飞轮、电力电子系统、可靠的电机等, 连接和提供支撑的元件是真空室、轴承支撑系统、备用轴承及其他附加设备等。

谷值负荷时, 飞轮储能系统由工频电网提供电能, 驱动电机工作, 从而带动飞轮加速旋转, 电能转化为机械能的形式储存起来; 出现峰值负荷时, 由于拖动电机旋转, 飞轮逐渐减速, 通过电力电子器件向外输出功率, 将机械能转变为了电能释放出去^[27]。一般情况下, 飞轮储能系统运行分为三个过程: 加速充电, 减速放电和空载运行。其能量示意图如图 1 所示。

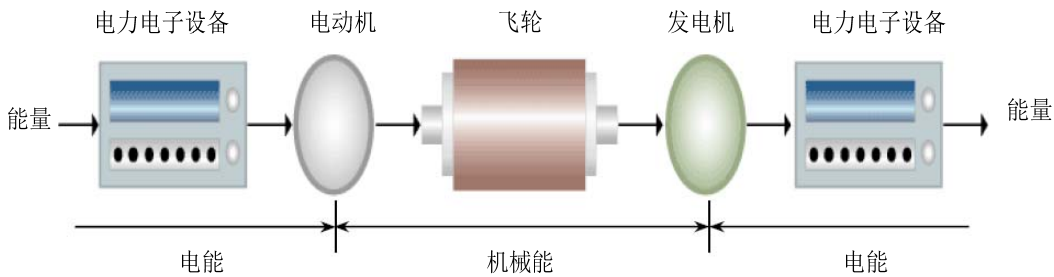


图1 飞轮储能能量示意图

根据飞轮的转速，可以将飞轮储能系统分为高速飞轮储能和低速飞轮储能，一般情况下，额定转速在 10000r/min 以上的高速飞轮储能系统，额定转速在 10000r/min 以下的为低速飞轮储能系统。不同类型的飞轮储能系统结构各不相同，图 2 和图 3 分别为高速飞轮储能系统结构和低速飞轮储能系统结构。

由图 2 可知，高速飞轮储能系统主要由飞轮、电机、钛轴、传感器、电力电子等部分组成。高速飞轮的转速最高可达 40000~50000r/min，由于普通金属制成的飞轮无法承受这样高的转速，高速飞轮一般由碳纤维制成，以减少充放电过程中的能量损耗和整个系统的重量。此外，飞轮和电机通常都是用磁悬浮轴承用来减少机械摩擦，并且将飞轮和电机放置在真空容器中，以减少空气摩擦，这样，高速飞轮储能系统的输入输出效率可达 95% 左右。

由图 3 可知，低速飞轮储能系统的组成部分和高速飞轮储能系统基本相同。由于最高转速比高速飞轮小，因而对材质的要求也相对不高，能量转换效率也略低，但是总体制造成本也相应便宜。

飞轮储能装置中的关键部分是内部电机，它不但充当发电机的作用，同时也要作为电动机进行运行。在充电储能时期，充当电动机，由外部的电能驱动系统装置中的电机，飞轮内部转子加速旋转；在放电释能时期，充当发电机，飞轮转速不断下降，向外界提供电能；在飞轮转子空转时期，由于整个系统处在真空环境中，因此以最小损耗运行，在研究过程中这种损耗往往忽略不计。可见，电机的低损耗、高效率直接关系到能量的高效传递，而飞轮储能系统灵活性和可控性提高的关键在于电力电子转换器，所以导致了飞轮储能系统对材料、技术的要求偏高，也就使它的成本和造价变得相对昂贵，是当前飞轮储能技术发展应用的瓶颈之一。

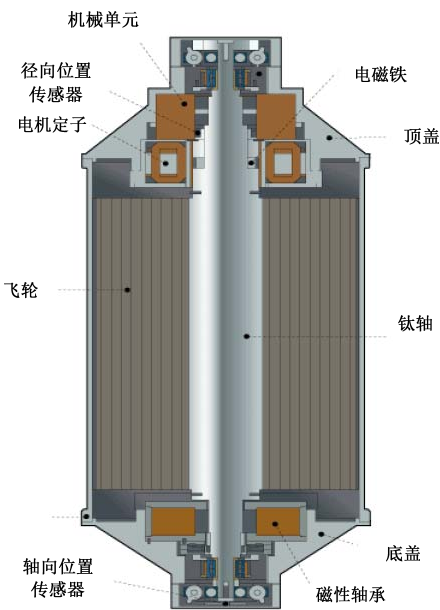


图2 高速飞轮储能结构

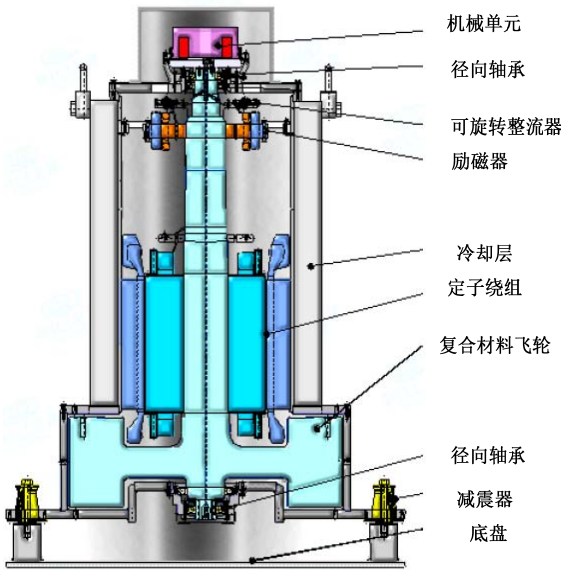


图3 低速飞轮储能结构

2 飞轮储能系统的特性

2.1 飞轮储能系统的能量特性

该系统的能量 E 可以用如下公式表示:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

式中: ω 为飞轮转子转速, rad/s; J 为转子的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

飞轮储能系统可释放或者储存的能量 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} J \omega^2 - \frac{1}{2} J \omega_L^2 \quad (2)$$

式中: ω_L 为飞轮储能系统在充放电循环中设定的最低转速, rad/s。

通常情况下, 额定最高转速 ω_H 是额定最低转速 ω_L 的 2 倍, 即 $\omega_H = 2\omega_L$ 。当 $\omega = \omega_H$ 时, 飞轮达到设计的最大储能 ΔE_{\max} :

$$\Delta E_{\max} = \frac{1}{2} J (2\omega_L)^2 - \frac{1}{2} J \omega_L^2 = \frac{3}{2} J \omega_L^2 \quad (3)$$

从式 (3) 可知, 提高飞轮转速 ω 是增加飞轮储能最有效手段, 但大功率高速飞轮储能系统造价很昂贵。在工程应用中, 以 10000r/min 以下的钢转子飞轮储能为主。

其次, 可以通过增大飞轮转子的转动惯量 J 来提高飞轮储能的能量:

$$J = kMR^2 \quad (4)$$

式中: k 为飞轮材料系数; M 为飞轮转子质量, kg; R 为飞轮转子的最大半径, m。

此外, 飞轮储能系统的能量利用率为飞轮储能系统的最大可利用能量与自身所带的最大能量之比, 可以表示为:

$$R_f = \frac{\Delta E_{\max}}{\frac{1}{2} J \omega_H^2} = 1 - \left(\frac{\omega_L}{\omega_H} \right)^2 \quad (5)$$

2.2 飞轮储能系统的功率特性

$$P = \frac{d\Delta E}{dt} \quad (6)$$

式中: P 为飞轮储能系统的功率, W; ΔE 为储能系统能量的变化, J;

根据式 (1) 和 (6), 可得到:

$$P = \frac{d\Delta E}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} J \omega^2 - \frac{1}{2} J \omega_L^2\right)}{dt} = J \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

2.3 传动链模型

忽略飞轮系统中电动/发电机及其电力电子变换器的动态过程, 将飞轮系统简化为单质量块。作用于单质量块飞轮系统上的力矩只有电动/发电机的电磁转矩, 其运动方程如下:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (8)$$

式中: T 为作用在飞轮轴上的电磁转矩, N·m; J 为飞轮系统的转动惯量(包括飞轮转子和电动/发电机转子的转动惯量), $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为飞轮的角速度, rad/s; f 为粘性摩擦系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

一般情况下, 由于 $f=10^{-4} \sim 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 相对而言很小, 可以忽略不计, 因此, 式 (8) 可以化简为:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \approx J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

2.4 飞轮储能系统的充放电和控制

图 4, 图 5 分别为飞轮储能系统功率吸收或释放仿真图和飞轮转速曲线图。

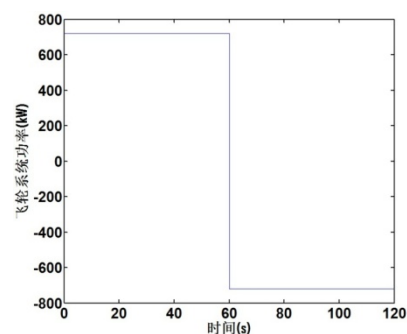


图 4 飞轮系统吸收或释放功率图

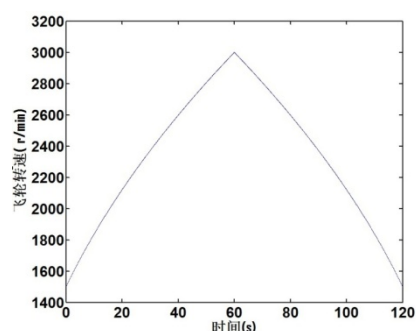


图5 飞轮转速曲线图

由图4和图5可知,在 $t=60\text{s}$ 之前,外界向飞轮储能系统持续充电,功率为 700 kW ,飞轮系统处于加速储能状态,飞轮转速由 1500 r/min 逐渐提高到 3000 r/min , $t=60\text{ s}$ 之后,飞轮储能系统持续充电向外界持续放电,功率为 700 kW ,飞轮系统处于减速释能状态,飞轮转速由 3000 r/min 逐渐降低到 1500 r/min 。

飞轮储能系统可以采用恒功率控制或恒转矩控制。

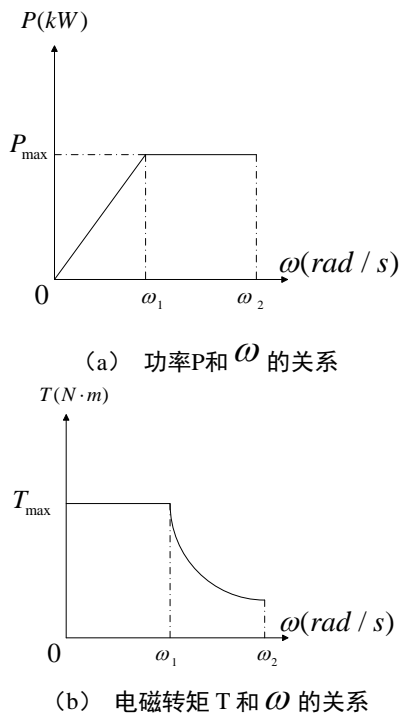


图6 恒功率、恒转矩控制图

根据图6,飞轮储能系统的功率 P 和电磁转矩 T 跟飞轮角速度 ω 的关系主要有:

(1) 当 $0 \leq \omega \leq \omega_1$, 功率 P 随着 ω 的增大而增大,成正比关系,即 $P = K\omega$,而转矩 T 则保持不变,已恒定最大值输出;

(2) 当 $\omega > \omega_1$, 功率 P 不再随 ω 的增大而增大,其保持最大值不变,而转矩 T 则开始随着 ω 的增大而减小,成反比关系,即 $T = \frac{K}{\omega}$ 。

同时,飞轮储能系统可以优化控制功率输出,起到平抑功率波动的作用,减小对电网和负荷的冲击。图7分别给出了含飞轮储能和不含飞轮储能的功率输出曲线,图8为含飞轮储能系统对应的飞轮

实时转速。

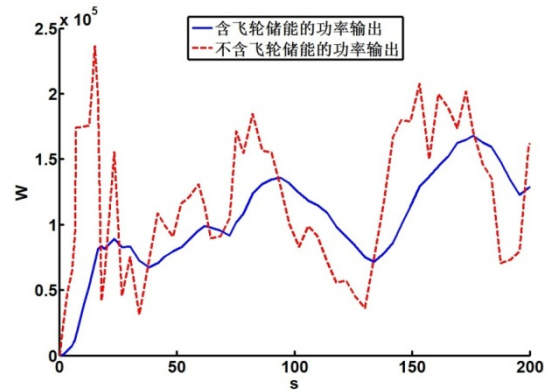


图7 含飞轮储能和不含飞轮储能的功率输出曲线图

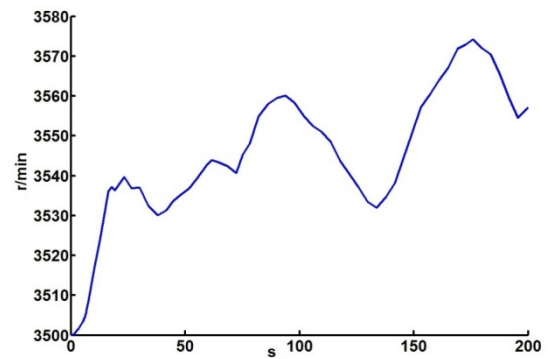


图8 含飞轮储能系统对应的飞轮实时转速图

由图7和图8可知,可以看到,这种功率变化带有很大的间歇性和波动性,对电网的稳定性会产生一定的影响,飞轮储能系统较好地改善了功率的波动,起到了削峰填谷的作用,平均功率输出稳定在 $50\text{--}150\text{ kW}$ 之间,较为理想。

3. 飞轮储能的国内外研究现状

3.1 国外研究现状

飞轮储能的概念大概起源于五十年前^[3],当时全球范围内正经历着石油禁运和天然气危机时期,美国能源部(DoE)和美国能量研究发展署资助(ERDA)飞轮系统的开发和应用,最初的构想是将其应用于电动汽车,但由于当时技术水平的限制,飞轮储能的发展一直处于停滞状态。到90年代提出了飞轮电池,用机械能进行储能,突破了化学电池的局限。之后,高强度纤维复合材料、磁悬浮技术、现代电力电子学等^[4-6]关键技术领域取得了重要的突破,为飞轮储能技术的发展搭建了基础平台,随着研究与应用的深入,飞轮储能技术越来越

越受到人们的认可，它潜在的优越性和价值也逐渐地得到了体现^[7]。

目前，世界主要发达国家如美国、欧盟和日本等在飞轮储能技术方面已经取得了不小的突破，开始由实验室研究逐渐转向试运行和实际应用阶段，表 1 为主要发达国家飞轮储能研究现状^[8]。

表 1 主要发达国家飞轮储能研究现状

国家	成果
美国	1. 飞轮系统公司(USFS)与 Honey-well 公司合作研制出电动汽车用飞轮电池，充电后飞轮的最高转速可达到 20 万转/分钟，密度为铅酸电池的 3~6 倍，寿命为 20 年左右； 2. Beacon 公司在纽约 Stephen 镇完成世界上最大的飞轮储能系统(20MW)的安装运营。
欧盟	设计 5MWh/100MW 超导飞轮储能电站，电站由 10 个飞轮模块组成，每个模块储能 0.5MWh，功率 10MW，重 30t，直径 3.5m、高 6.5m，用同步电动/发电机进行电能输入输出。运行转速为 2250-4500rpm，系统效率 96%。
日本	三菱、日立、精工等公司研制出 3 种高温超导磁悬浮轴承飞轮储能试验模型机，进行了储能 8MWh 容量 1000kW 的飞轮储能机组的概念设计。

3.2 国内研究现状

飞轮储能技术在我国的发展相对于发达国家来说较晚，并且其投资规模与技术水平也相对较低。但是近几年来，随着国家重视程度的日益提高，相关高校和科研机构加大对飞轮储能的研究与开发，取得了一定的成绩，表 2 为我国飞轮储能研究现状^[9]。

表 2 我国飞轮储能研究现状

单位	成果
北京飞轮储能柔性研究所	实现了立轴旋转系统是永磁高温超导的联合磁悬浮，飞轮重 20kg，转速 3000r/min
清华大学	研制出了复合材料高储能密度飞轮
中国科学院电工研究所	研制出了飞轮储能装置的高速电机
华北电力大学	成功研制出最高发电功率 10kW 的准磁悬浮飞轮储能装置
东南大学	设计和研究了基础固定式飞轮储能系统机电耦合与解耦
西安交通大学	研究了星载磁悬浮飞轮系统非线性机电耦合振动控制问题

4 飞轮储能的技术应用

飞轮储能技术的应用主要集中在储能和峰值动力使用两大类，具体应用体现在以下几方面：

4.1 UPS 不间断电源

UPS 不间断电源（Uninterruptible Power System）是一种利用储能装置向负载提供高质量电能和设备，在医疗设备、通信、计算机系统领域有着广泛的应用。目前的 UPS 逐渐倾向于使用飞轮储能装置等新型储能设备，既减少了环境污染，延长了使用寿命，同时也提高了工作效率^[14]。文献[1]

对传统的 UPS 系统进行了改进，采用飞轮储能技术替代传统的化学电池，并且研究了旋转下飞轮储能系统充、放电控制策略，优化了飞轮充电曲线，改进了智能控制算法。文献[15]搭建了用飞轮储能系统作为后备电源的新型 UPS 系统，进行了监测和分析，验证了可行性，同时给出了相应的国内推广建议。

4.2 节能

能源利用率一直是我们比较关注的话题，节能已经得到广泛的共识。传统的机械装置，进行机械制动后能量被转化为热能而流失，造成了一定程度上的浪费，降低了能源的使用效率^[16]。因此，通过飞轮储能装置把这部分能量转化为动能存储起来，在需要的时候，输出到系统中，可以减少能量损失，提高能量的利用率，目前主要的应用领域集中在新能源汽车和城市轨道交通等方面。飞轮储能系统可以单独或与其他动力装置一起混合用于电动汽车上，能够改善电动汽车的经济性和动力性，间接减少了尾气排放，减小了对环境的污染程度^[17]。城市轨道交通由于定点停车，不断地处于启动停靠状态，因此，电能转换而来的机械能处于持续不断的浪费中。采用飞轮储能装置，依靠动能回收系统（Kinetic Energy Recovery Systems，KERS）进行能量回收与释放，相对于使用锂电池，飞轮储能系统效果更优。

4.3 传统电力系统

飞轮储能技术应用于传统电力系统中，能够较好地调节有功功率，削峰填谷，增大功率因数，稳定电压和频率，并对改善电能质量和稳定负荷具有良好的作用。暂态稳定性问题一直是电力系统稳定运行和分析的重点，依靠飞轮储能的瞬时功率大、响应迅速、充放电完成时间短等特点，投入到电力系统中去，能够快速主动地参与电力系统动态过程，消除扰动并缩短暂态过程，尽量避免了电压崩溃、低频振荡等危险状况的出现，为电力系统恢复到稳定运行起到了积极作用。2002 年，日本 Kansai 电力公司将飞轮储能技术应用于 3.3kV 电力系统中，用于改善电网的稳定性，效果显著^[18]。文献[19]应用飞轮储能系统补偿阻尼系统的低频振荡，从最佳安装地点、参数整定策略角度分析，仿真结果验证了飞轮储能系统在抑制低频振荡，提高系统稳定性方面的能力。飞轮储能装置和电机结合在一

起,离不开电机的辅助,因此电机的选择与控制将直接影响到飞轮储能装置。文献[13]提出永磁无刷直流电机回馈制动新6拍脉宽调制方式,并将之应用于高速飞轮储能系统,在改善相电流波形,减小无刷直流电机在高速发电机状态下转矩脉动起到了一定作用。

4.4 微网

目前,微网(Microgrid)作为一个小型发电系统,能够实现自我监控、自我调节,既可以并网运行,也能独立运行。因此,相对于传统大电网而言,微网由于分布式电源多、位置灵活、分散等特点,需要有储能系统的支撑于保障。在微网能量充足时,飞轮储能系统将多余的能量存储起来,稳定端电压;当微网发生故障,或出现功率性缺额现象时,将存储的能量释放出去,增强了局部供电可靠性,维持了微网的频率稳定。文献[20]将飞轮储能系统应用于微网,作为微网的储能元件,提出了并网时的控制策略,在主网络出现故障时,起备用电源作用,支撑了微网的可靠性;在微网和主网络正常时段,可以改善电能质量,削峰填谷。文献[21]在微网系统中应用柴油发电机和飞轮储能系统,柴油发电机可以提供强大的功率支撑,稳定负荷,飞轮储能系统可以调节负荷波动,削峰填谷,两者结合,并采取适当的控制方式,仿真实验证明了混合系统在微网系统中的有效性和经济性。

4.5 可再生能源的并网

飞轮储能技术的一个关键应用领域之一应当是可再生能源的并网[22]。当前,风力发电、光伏发电等新能源因为清洁、巨量、可再生等优点,越来越多的关注。但是由于风光等可再生能源自身的间歇性和波动性,并网后增大了电网的冲击,对电力系统的安全稳定运行造成了一定的影响。而飞轮储能系统作为一个可灵活调控的有功源,能稳定并网频率和电压,减小可再生能源的波动性,削峰填谷,降低对电网的冲击,有效地改善了可再生能源并网过程中产生的电能质量问题,确保了安全性和可靠性。文献[23, 24]提出了风力发电结合的飞轮储能系统,综合了频率和功率的调节与控制,根据实际风速,仿真平稳输出功率和电网频率控制。文献[25]的研究对象是永磁直驱风力发电机,分析了当前控制方法下,把飞轮储能系统安装在直流端侧,研究有功功率平滑输出,设计了相应的飞轮储

能系统能量控制策略,并给出了平滑功率值的计算方法。文献[26]创新性地将广义动量概念应用于可再生能源中,提出了能量补偿的新控制方法。该控制从调节飞轮储能系统转速出发,对可再生发电的动量进行计算,并对电网系统进行可靠的监视与能量补偿。

5 结束语

本文结合飞轮储能系统的优点,介绍了其工作原理和分类,并对高速和低速两类飞轮储能系统做了性能分析和比较。重点分析了飞轮储能系统的能量特性、功率特性、传动链模型以及充放电控制等,为其深入研究提供了模型依据和理论基础。最后阐述了目前国内外飞轮储能的研究现状,介绍了飞轮储能的技术应用,展示了其广泛的应用前景和潜在的巨大效益。

参考文献:

- [1] 陈峻岭,姜新建,朱东起,等. 基于飞轮储能技术的新型UPS的研究[J]. 清华大 学学报(自然科学版), 2004, 44(10): 1321-1324.
- [2] 杨锋,于飞,张晓峰,等. 飞轮储能系统建模与仿真研究[J]. 船电技术, 2011, 31(4): 3-7.
- [3] 魏建新,路一平,秦景. 独立太阳能光伏发电系统储能单元设计[J]. 电源技术, 2010, 34(7): 676-678.
- [4] Tarrant C. Revolutionary Flywheel Energy Storage System for Quality Power[J]. Power Engineering Journal, 1999, 7(2): 159-163.
- [5] Lee J, Han Y H, Park B J. Concept of Cold Energy Storage for Superconducting Flywheel Energy Storage System[J]. IEEE Transactions On Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 2221-2224.
- [6] Carrasco M, Franquelo G, Bialasiewicz T, et al. Power-Electronic Systems for The Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions On, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [7] 田军,朱永强,陈彩虹. 储能技术在分布式发电中的应用[J]. 电气技术, 2010, 12(8): 28-32.
- [8] 李五一. 飞轮储能系统的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [9] 蒋书运,卫海岗,沈祖培. 飞轮储能技术研究的发展现状[J]. 太阳能学报, 2000, 21(4): 427-433.
- [10] Jack B. Flywheel Technology: Past, Present, and 21st

- Century Projections [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 13(8): 13-16.
- [11] 李永丽,张惠智,谈震,等. 飞轮储能技术在电力系统中的应用[A].第十三届中国科协年会第15分会场-大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集[C].中国电机工程学会,2011.
- [12] Tsao P, Senesky M, Sanders S. An Integrated Flywheel Energy Storage System with Homopolar Inductor Motor-generator and High-Frequency Drive[J]. IEEE Transactions On Industry Applications, 2003, 39(6): 1710-1725.
- [13] 黄宇淇,姜新建,邱阿瑞. 飞轮储能能量回馈控制方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(7): 1085-1088.
- [14] 革命性的技术,革命性的选择(一)——最新一代免蓄电池磁悬浮飞轮储能UPS的特点和优势[J]. 通信电源技术, 2008, 22(1): 83-84.
- [15] 陈凤,成彬,王涛,等. 磁悬浮飞轮储能设备在UPS系统中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2012,29(2): 1-4.
- [16] 张子英. 车辆电储能制动能量回收系统研究[D]. 太原:中北大学, 2011..
- [17] 蒋启龙,连级三. 飞轮储能在地铁系统中的应用[J]. 变流技术与电力牵引, 2007, 13(4): 13-17.
- [18] 戴兴建,邓占峰,刘刚,等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 133-140.
- [19] 史林军,陈中,王海风,等. 应用飞轮储能系统阻尼电力系统低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 29-33.
- [20] 黄宇淇,方宾义,孙锦枫. 飞轮储能系统应用于微网的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 11(9): 83-87.
- [21] 黄宇淇,董琴,诸嘉惠. 飞轮及柴油发电混合储能系统应用于微网的仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(3): 32-37.
- [22] Orlando S G, Gustavo M M, Enrique M P. Improving the Integration of Wind Power Generation into AC Microgrids Using Flywheel Energy Storage [J]. Smart Grid, IEEE Transactions On, 2012, 4(3): 1945-1954.
- [23] Cimuca G, Saudemont C, Robyns B, et al. Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator[J]. IEEE Trans On Industrial Electronics, 2006, 4(53): 1074-1085.
- [24] 孙春顺,王耀南,李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 111-116.
- [25] 胡雪松,孙才新,刘刃,等. 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 79-83.
- [26] 姬联涛,张建成. 基于飞轮储能技术的可再生能源发电系统广义动量补偿控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 28(24): 101-106.
- [27] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
-
- 作者简介:**
- 马骏毅 (1987-), 男, 浙江宁波人, 硕士毕业, 从事电网调控工作;
- 陈 蕾 (1992-), 女, 江苏扬州人, 工学学士, 从事电网调控工作;
- 王弘法 (1990-), 男, 江苏盐城人, 工学学士, 从事电网调控工作;
- 陈国华 (1972-), 男, 江苏常州人, 工学学士, 工程师, 从事配网、农网工程管理工作;
- 黄 治 (1978-), 男, 江苏镇江人, 工学学士, 工程师, 从事电力规划设计管理工作;
- 姚 勇 (1991-), 男, 江苏扬中人, 工学学士, 从事输电运检工作。